

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК ПРИ ТЕРМОУПРОЧНЕНИИ В УСТРОЙСТВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Ю.Г. Ярошенко¹, Ю.И. Липунов², К.Ю. Эйсмонт²,
М.В. Захарченко², Е.В. Некрасова²

¹ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия),

²ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической
теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)
(г. Екатеринбург, Россия)

Рельсовая накладка является одним из ключевых элементов стыкового соединения рельсов и представляет собой тело с элементами разной массивности. При закалке сложного профиля по классической технологии в объеме масла невозможно обеспечить отвод разного количества тепла от элементов разной массы, что неизбежно приводит к искривлению накладок и нестабильности обеспечения механических характеристик. В ОАО «ВНИИМТ» была опробована и реализована технология регулируемого ускоренного охлаждения, которая свободна от упомянутых недостатков и обеспечивает получение более мелкодисперсной структуры с меньшим размером зерна в сравнении с классическим способом закалки.

Ключевые слова: термоупрочнение, устройство водяного ускоренного охлаждения, спрейерные установки, закалка, рельсовая накладка, микроструктура.

Joint bar is a one of important elements of two rails to join them together in a track. It is a body with different mass elements. It is impossible to ensure the removal of heat different amounts from the elements with different mass during conventional oil quenching which inevitably leads to a distortion of linings and instability of mechanical properties. The advanced technique of regulates accelerated water cooling was developed and implemented. It is free from the above disadvantages and provides a fine microstructure with a smaller grain size in comparison with the conventional technique of quenching.

Keywords: thermostrengthening, accelerated water cooling system, sprayer systems, quenching, joint bar (fishplate), microstructure.

Железнодорожный транспорт является одним из ведущих видов перевозок в России [1]. В работе [2] показано, что наиболее напряженным местом пути является рельсовый стык. Рельсы скрепляются накладками, сжимаемыми с двух сторон болтами. ГОСТ [3] установлены жесткие требования к прямолинейности накладок и к механическим свойствам, которые обеспечиваются объемной закалкой в масле. Как видно из рис. 1, накладка в сечении имеет сложный профиль, являясь несимметричным телом с элементами разной массивности (верхняя головка, шейка, нижняя головка), поэтому существенным недостатком закалки данного изделия, например в масле, является неуправляемость процессом охлаждения с точки зрения отвода тепла от разномассивных элементов. Вследствие этого сложно обеспечить прямолинейность изделий и стабильность получения механических свойств. Кроме

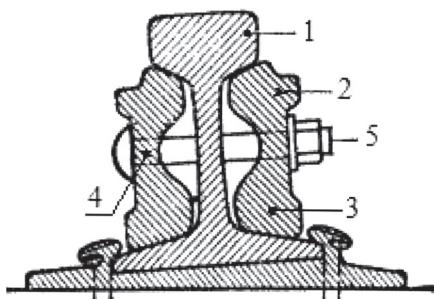


Рис. 1. Стандартный рельсовый стык с накладками Р65:

1 – головка рельса; 2 – верхняя головка рельсовой накладки; 3 – нижняя головка рельсовой накладки; 4 – шейка накладки; 5 – стыковой болт

того, масло пожароопасно, что создает обслуживающему персоналу тяжелые условия работы.

При строительстве нового участка по производству рельсовых накладок на Нижнесалдинском ме-

таллургическом заводе была поставлена задача разработать и внедрить экологически совершенную технологию ускоренного водяного охлаждения и устройство для ее реализации [4].

Целью разработки технологии являлось определение тепловых режимов работы устройства ускоренного водяного охлаждения, которые обеспечивают требуемые механические свойства и прямолинейность готового изделия. На основе предыдущего опыта разработки подобных устройств было предложено реализовать струйное водяное охлаждение по прерванной схеме, когда охлаждение водяными струями чередуется с естественным охлаждением на воздухе. Интенсивное охлаждение формирует в поверхностном слое закаленную структуру, далее при прерывании охлаждения поверхностный слой разогревается и происходит самоотпуск, затем повторяющаяся стадия охлаждения снижает температуру всего изделия до температуры самоотпуска.

На первом этапе разработки технологии и оборудования было проведено математическое моделирование процесса охлаждения рельсовой накладки на основании двумерного уравнения нестационарной теплопроводности.

$$\rho \cdot c(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1)$$

где t – температура, °C; $c(t)$, $\lambda(t)$ – удельная теплоемкость, Дж/кг·°C, и теплопроводность, Вт/м·°C, материала тела; ρ – плотность металла, кг/м³; n – нормаль к поверхности накладки; τ – время, с.

Моделирование основано на инженерной методике расчета охлаждения стального проката, разработанной в ОАО «ВНИИМТ» с учетом результатов большого числа экспериментальных данных, полученных на промышленных и стендовых устройствах. В данной методике при расчете струйного охлаждения использованы граничные условия второго рода, т.е. задают распределение плотностей теплового потока, которые зависят от плотности орошения водой:

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{\text{пов}} \geq 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср.}}) \text{ при } t_{\text{пов}} < 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{\text{пов}} \geq 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср.}}) \text{ при } t_{\text{пов}} < 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока на поверхности тела, Вт/м²; α – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности тела, Вт/м²·°C; x, y – координаты в поперечном сечении накладки; $t_{\text{пов}}$ – температура поверхности; $t_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды, °C.

При этом использовали аналитические зависимости плотности теплового потока от плотности орошения водой, полученные экспериментально ранее в промышленных условиях на устройствах контролируемого охлаждения разного типа [5]. При температуре поверхности рельсовой накладки ниже 100 °C применяли граничные условия третьего рода. Такие условия в соответствии с законом Ньютона–Рихмана задавались при охлаждении накладки на воздухе:

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср}}) + \varepsilon_m c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right] \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср}}) + \varepsilon_m c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right] \end{cases} \quad (3)$$

где ε_m – степень черноты поверхности; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·K⁴.

В ОАО «ВНИИМТ» разработан программный модуль, в котором решение уравнения (1) производится с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры. Исходные данные для расчета задаются в виде изображения сечения тела и точек вывода результатов расчета. Начальным условием была одинаковая температура по сечению изделия. На рис. 2 представлены результаты расчета при ускоренном водяном охлаждении для разных точек рельсовой накладки с двукратным прерыванием охлаждения.

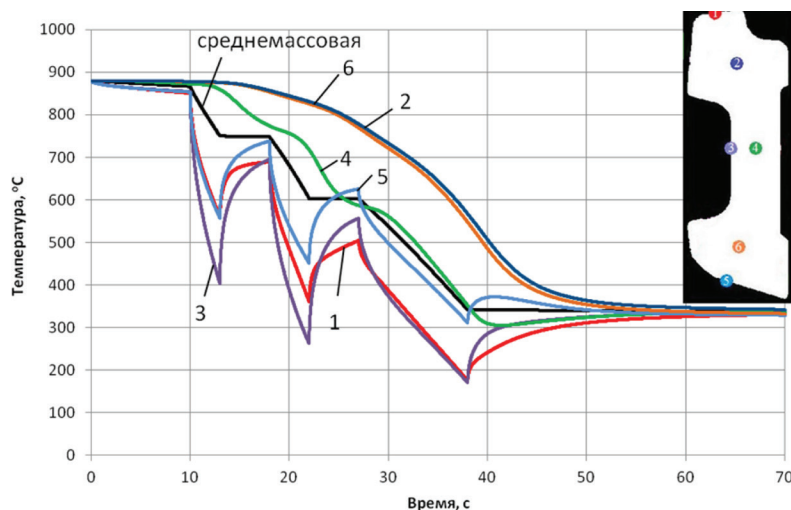


Рис. 2. Расчетное изменение температуры разных точек накладки во времени при двукратном прерывании охлаждения (номер и цвет кривой соответствует номеру и цвету расчетной точки)

На основе многовариантного расчетного моделирования были предварительно оценены конструктивные параметры устройства [6]: общая длина, минимальные и максимальные расходы воды, количество форсунок и другие, и намечены различные режимы охлаждения, которые потребовали уточнения в условиях эксперимента.

В результате была предложена конструкция устройства, состоящая из трех секций, между которыми организовано два воздушных промежутка (рис. 3). Такая конструкция позволила осуществлять охлаждение накладок с различными скоростями изменения температур, т.е. она была способна обеспечивать охлаждение при различных плотностях орошения водой. Таким образом, появилась возможность изучить широкий диапазон режимов охлаждения и выбрать наиболее подходящий с точки зрения получения требуемых механических свойств.

Основными узлами в конструкции охлаждающего устройства были форсунки с плоским факелом, которые установили с четырех сторон накладок (рис. 3, б). Плоский факел позволял избежать возникновения «паровой рубашки» в месте натека струи воды на поверхность накладки. Были определены параметры форсунок, а именно диаметр отверстия, ширина щели, которая обеспечивала необходимое раскрытие струи воды. На каждый коллектор каждой секции устройства был организован отдельный подвод воды, благодаря чему стало возможным управлять процессом охлаждения и, следовательно, влиять на прямолинейность готового изделия. Первая и вторая секции – это секции высокоинтенсивного охлаждения, третья секция – низкоинтенсивного охлаждения.

Для проведения экспериментальных исследований по охлаждению рельсовой накладки струями воды и получения данных для адаптации модели на стенде ОАО «ВНИИМТ» была смонтирована данная установка. В процессе исследований было проведено два вида экспериментов: теплотехнические и технологические. Теплотехнические эксперименты были выполнены в целях адаптации математической модели и достижения равномерности охлаждения разномассивных элементов накладки, технологические – для определения режимов, обеспечивающих требуемые механические свойства.

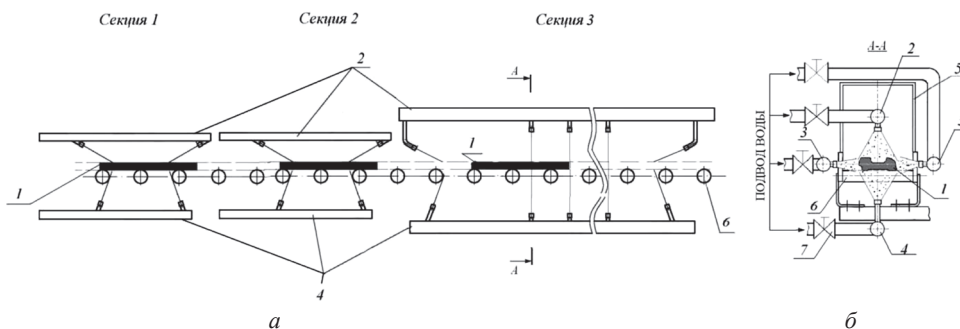


Рис. 3. Схема устройства ускоренного регулируемого охлаждения рельсовых накладок:
1 – рельсовая накладка; 2 – верхние коллекторы с форсунками; 3 – боковые коллекторы с форсунками;
4 – нижние коллекторы с форсунками; 5 – камера; 6 – ролики; 7 – вентиль

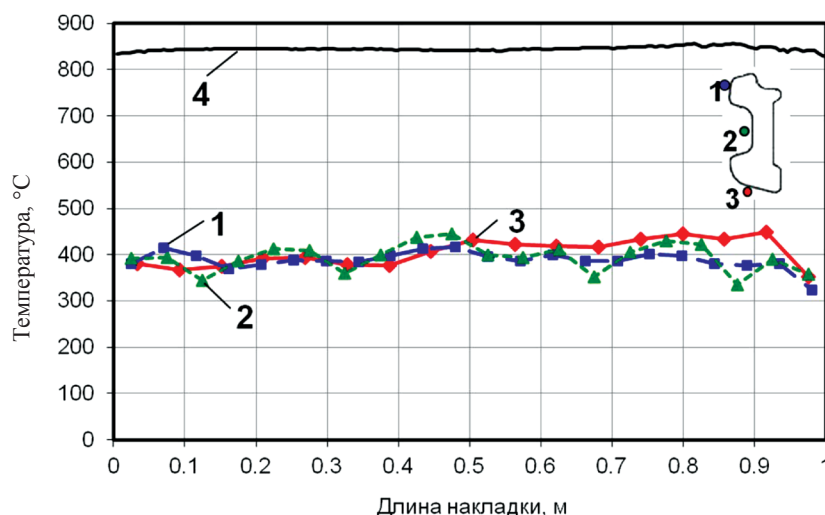


Рис. 4. Распределение температуры по длине накладки после выхода из устройства:
1, 2, 3 – температура поверхности по длине верхней головки, шейки и нижней головки соответственно;
4 – температура поверхности по длине шейки после выхода из печи до входа накладки в устройство охлаждения

Распределение температуры по длине разномассивных элементов накладки в одном из теплотехнических экспериментов приведено на рис. 4. Из анализа данных рис. 4 следует, что благодаря дифференцированному подводу воды на каждый коллектор удалось добиться охлаждения разномассивных элементов накладки до одинаковых температур. Об этом свидетельствуют температуры головок и шейки по длине накладки, которые практически совпадают.

Проведенные стендовые эксперименты показали, что механические свойства, получаемые при охлаждении в двух секциях устройства – высоко- и низкоинтенсивной не уступают свойствам, полученным при охлаждении в трех секциях устройства. Поэтому была принята конструкция устройства, состоящая из двух секций (№ 2 и № 3 на рис. 3).

Сведения о механических свойствах были получены для разных температур конца охлаждения, что позволило установить зависимость механических свойств от температуры окончания охлаждения (рис. 5) для сталей с содержанием углерода 0,53 %. Для такого металла температура окончания охлаждения лежит в пределах 350–450 °C.

Полученные зависимости позволяют определить диапазон температур конца охлаждения для металла с содержанием углерода 0,53 %: температура окончания охлаждения должна находиться в пределах 350–450 °C. Таким образом, критерием выбора тепловых режимов работы ускоренного охлаждения накладок является соответствие значений механических свойств термообработанных накладок требованиям нормативных документов [3].

Распределение твердости по сечению накладки для одного из экспериментов представлено на рис. 6. Полученные данные твердости по сечению профиля позволяют прогнозировать прочностные характеристики накладки, используя для этого сведения работы [7].



Рис. 5. Зависимость прочностных и пластических свойств рельсовой накладки Р65 от температуры конца охлаждения:

1 – относительное удлинение, 2 – относительное сужение, 3 – предел прочности, 4 – предел текучести

Микроструктура накладок до и после термоупрочнения была исследована с помощью оптического микроскопа (рис. 7, а, б) и растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV (рис. 8, а, б).

Структура накладки (рис. 7, а), не прошедшей термообработку, состоит из пластинчатого перлита и феррита, ориентированного по границам зерна. Балл зерна равен 4–5 [8], что эквивалентно диапазону размеров зерен в пределах 88–62 мкм. Микроструктура после термообработки (рис. 7, б и рис. 8) представляет собой плотный сорбитообразный перлит с выраженной ферритной сеткой по границе зерен, балл зерна при этом соответствует 7–8 [8]. В приповерхностном слое верхней головки рельсовой накладки (рис. 8) структура представляет собой дисперсный сорбит отпуска, при этом размер зерен не превышает 10–15 мкм.

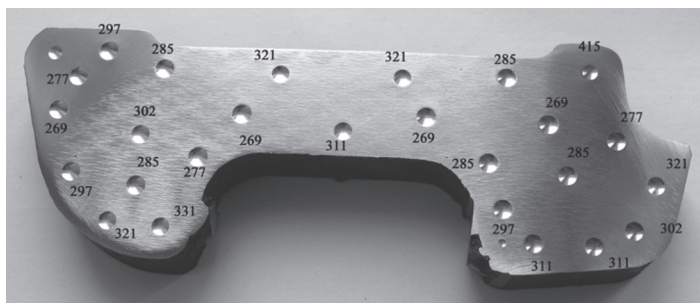


Рис. 6. Распределение твердости по сечению термоупрочненной накладки струями воды для одного из проведенных экспериментов

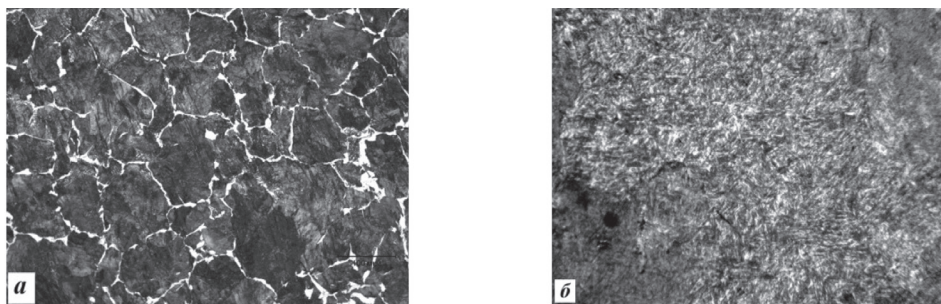


Рис. 7. Микроструктура нижней головки рельсовой накладки (0,53 %C) в горячекатаном состоянии (а) и после термоупрочнения в экспериментальном устройстве (б), $\times 200$

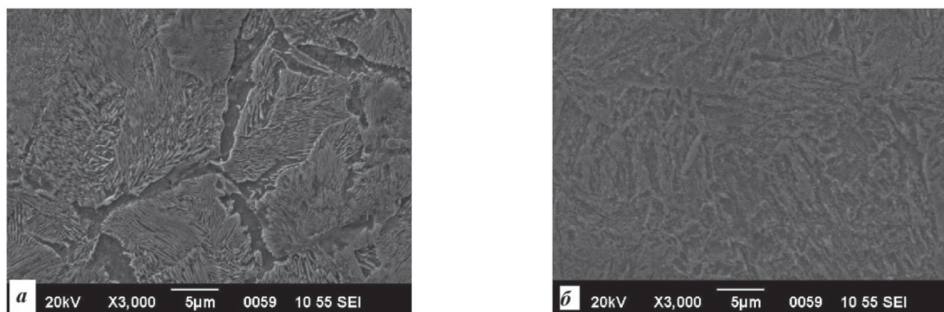


Рис. 8. Микроструктура середины верхней головки рельсовой накладки (0,53 %C) (а) и на расстоянии 500 мкм от кромки (б) после термоупрочнения в экспериментальном устройстве, $\times 3000$

На рис. 9 приведена рентгенограмма¹, полученная для центральной части шейки накладки, термоупрочненной в экспериментальном устройстве. Узкие и высокие дифракционные пики соответствуют ферриту (α -Fe), имеющему соответствующую плоскость (hkl) [9, 10]. Известно, что отражения с близкими межплоскостными расстояниями d_{hkl} фазовых составляющих могут накладываться друг на друга [11] и затруднять определение структурных составляющих по рентгенограмме, но другие фазы имеют существенно отличное расстояние d_{hkl} от пиков, соответствующих ферриту, и в этом случае их было бы видно. Анализ осуществлен для середины и кромки всех частей накладки: верхняя, нижняя головки, шейка, все рентгенограммы имеют идентичное строение.

Для сопоставления была изучена микроструктура объемно-закаленных в масле накладок с применением растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV в режиме вторичных электронов (рис. 10)². Условия закалки в масле: объем бака $V_m = 3 \text{ м}^3$, температура масла – около 20 °C. Температура нагрева накладки, с которой она поступала в бак, составила $t_{\text{нагр}} = 810\text{--}820 \text{ }^\circ\text{C}$.

¹ Исследование выполнено при содействии профессора Tong-Y F. Zhang и Hong Kong University of Science and Technology.

² В работе принимали участие А.Ю. Жиликов и К.Г. Гашков.

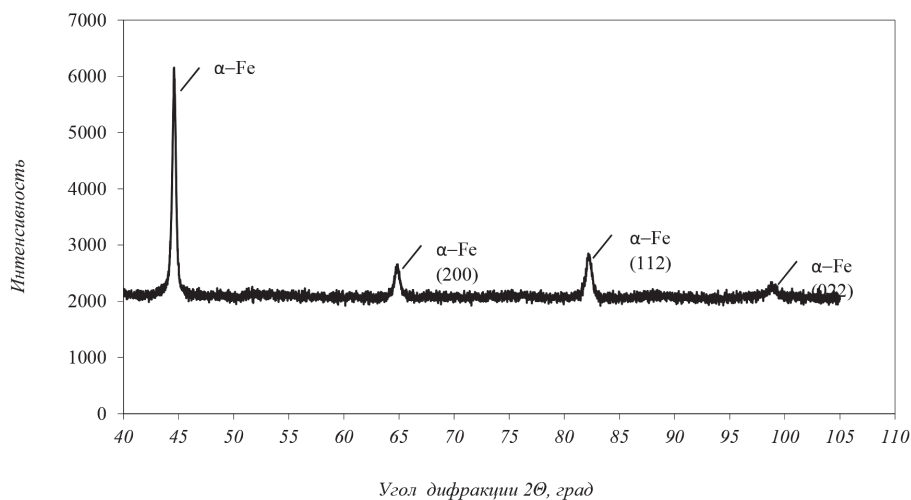


Рис. 9. Рентгенограмма середины шейки рельсовой накладки (0,53 %C)

Полученная структура представляет пластинчатый перлит с ферритом по границе зерна. Она отличается от представленной на рис. 8 неравномерной величиной зерен – от 40 до 70 мкм [8] и меньшей плотностью перлитной структуры.

Микроструктуры накладок, упрочненных в устройстве ускоренного водяного охлаждения, обладают более высокой степенью дисперсности и меньшим размером зерна в сравнении с закаленными по технологии объемной закалки в масле. Это обеспечивает высокий и стабильный уровень механических характеристик при ускоренном охлаждении водой [6], что не достигается при закалке рельсовых накладок в масле [12].

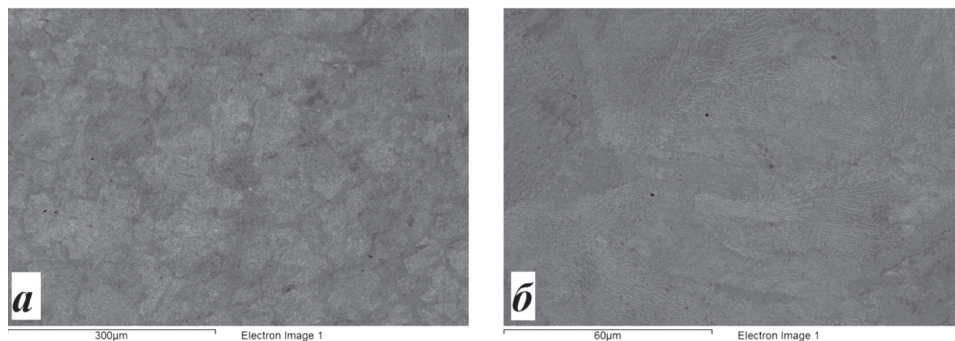


Рис. 10. Микроструктура верхней головки образца 0,57 % C после охлаждения в объеме масла:
a – $\times 200$; *б* – $\times 1000$

Выводы

Проведенное математическое моделирование процесса струйного охлаждения рельсовой накладки позволило определить основные конструктивные параметры устройства. Проведены исследования процесса охлаждения накладки на экспериментальной установке ОАО «ВНИИМТ» с определением режимов работы, обеспечивающих требования действующей нормативной документации к качеству рельсовых накладок, в том числе к прямолинейности. Главным достоинством устройства и технологии является возможность управления процессом охлаждения посредством регулирования расходов воды, подаваемой на разномассивные элементы изделия. Установлено, что фазовые составляющие микроструктуры накладок, термоупрочненных в устройстве ускоренного охлаждения и в объеме масла, одинаковы. Значительное отличие проявляется по размеру зерен и степени дисперсности фазовых составляющих. Последнее и обуславливает стабильное получение требуемых механических характеристик накладок, термоупрочненных по технологии ускоренного водяного охлаждения, что не достигается при закалке рельсовых накладок в масле.

Список использованных источников

1. Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень [Электронный ресурс]. – 2014. – Январь–декабрь. – С. 74. – Режим доступа: http://www.mintrans.ru/upload/iblock/576/stat_2014.pdf
2. Бородин А.В., Ковалева Н.В. Стыковое соединение рельсов / А.В. Бородин, Н.В. Ковалева // Железнодорожный транспорт. – 2000. – № 6. – С. 69.
3. ГОСТ 4133–73 Накладки рельсовые двухголовые для железных дорог широкой колеи. Технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 7 с.
4. Калягин В.Н., Темпалов В.А., Абрамов Э.В., Липунов Ю.И., Эйсмонт К.Ю., Старцева М.В. Реализация проекта строительства линии по производству рельсовых накладок с применением для термообработки экологически чистых сред на Нижнесалдинском металлургическом заводе / В.Н. Калягин, В.А. Темпалов, Э.В. Абрамов, Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт, М.В. Захарченко (М.В. Старцева) // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 28–29.09.2011 г.): сборник научных докладов. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2012. – С. 218–224.
5. Эйсмонт К.Ю. Разработка и внедрение в производство устройств термоупрочнения проката регулируемым охлаждением на основе анализа процессов теплообмена: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: УрФУ, 2011.
6. Захарченко М.В. Разработка и внедрение устройства и технологии ускоренного охлаждения для обеспечения механических свойств металла рельсовых накладок: Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Захарченко Мария Владимировна. – Екатеринбург, 2014. – 136 с.
7. Таблица соответствия твердости и предела прочности стали // Балтийские металлы. – 2000. – № 5(16). – С. 10–11.
8. ГОСТ 5639–82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 38 с.
9. Недома И. Расцифровка рентгенограмм порошков / И. Недома. – М.: Металлургия, 1975. – 424 с.
10. Alphabetical Indexes (Inorganic Phases) sets-44. The International Centre for Diffraction Data, USA: 2011.
11. Кузнецова Г.А. Качественный рентгенофазовый анализ (методические указания) / Г.А. Кузнецова. – Иркутск: Ир. гос. ун-т, 2005. – 28 с.
12. Отработка технологии термоупрочнения рельсовых накладок на опытной стенде ОАО «ВНИИМТ»: отчет о НИР / Екатеринбург: ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), 2012. – С. 45–47.